

В.О. Залога, д-р техн. наук, Ю.В. Шаповал, Суми, Україна

МЕТОДИКА ОЦІНЮВАННЯ ДИНАМІЧНОГО СТАНУ СИСТЕМИ РІЗАННЯ ШЛЯХОМ ВИЗНАЧЕННЯ ГЕОМЕТРИЧНИХ ПАРАМЕТРІВ ЯКОСТІ ОБРОБЛЕНОЇ ПОВЕРХНІ

Розглянуто взаємозв'язок динамічного стану системи різання (амплітуди та частоти коливань, що виникають у процесі різання при точінні) з геометричними параметрами якості обробленої поверхні – шорсткістю та хвилястістю. Запропонована модернізація профілометра моделі П-283 та розроблена методика оцінювання динамічного стану системи різання шляхом визначення геометричних параметрів якості обробленої поверхні. Доказано, що за шорсткістю і хвилястістю обробленої поверхні можна отримувати з допомогою модернізованого профілометра динамічні параметри процесу точіння, наприклад, частоти коливань, що виникають у процесі різання.

Ключові слова: методика оцінювання динамічного стану

Рассмотрена взаимосвязь динамического состояния системы резки (амплитуды и частоты колебаний, возникающих в процессе резания при точении) с геометрическими параметрами качества обработанной поверхности - шероховатостью и волнистостью. Предложена модернизация профилометра модели П-283 и разработана методика оценки динамического состояния системы резания путем определения геометрических параметров качества обработанной поверхности. Доказано, что по шероховатости и волнистости обработанной поверхности можно получать с помощью модернизированного профилометра динамические параметры процесса точения, например, частоты колебаний, возникающих в процессе резания.

Ключевые слова: методика оценки динамического состояния

In article was considered the interrelations of the dynamic condition of the cutting system (amplitude and frequency of oscillations arising during turning) with geometrical parameters of the quality of the treated surface – roughness and waviness. There was the modernization of profilometer of model p-283 proposed and a method of evaluating the dynamic state of the cutting system developed by determining the geometric parameters of the quality of the treated surface. It is proved that the roughness and waviness of the treated surface can be obtained by a modernized profilometer, the dynamic parameters of the turning process, for example, the oscillation frequencies that arise during the cutting process.

Keywords: method of evaluating the dynamic state

Вступ

Відомо, що якість сучасних машин (їхня функціональна надійність та довговічність), які, як правило, є складними механічними системами, в значній мірі залежить від якості деталей, що входять до складу відповідних її механізмів і вузлів, що визначається не тільки точністю розмірів, геометричної форми та взаємного розташування, а також і якістю їхніх

оброблених поверхонь: геометричними параметрами (відхиленням форми, шорсткістю та хвилястістю) та фізико-механічними властивостями поверхневого шару (мікротвердістю, залишковими напруженнями, структурою), які формуються у результаті пружних та пластичних деформацій у первинній та вторинних зонах деформацій, а також теплової і силової взаємодії між оброблюваною деталлю та інструментом, у тому числі й у процесі його зношування [1, 2]. Хвилястість представляє собою сукупність періодично повторюваних виступів і западин з взаємною відстанню, значно більшою, ніж у нерівностей, що утворюють шорсткість, тобто є сукупністю нерівностей з кроками, що перевищують базову довжину, прийняту для вимірювання шорсткості [3]. Такий підхід до поділу шорсткості і хвилястості є сформованим в процесі вивчення нерівностей під впливом розвитку техніки вимірювань, але є вельми умовним. Фізично обґрунтованої, а тим більше природної фізичної границі між шорсткістю і хвилястістю поверхні у теперішній час ще немає. Разом з тим, у машинобудуванні прийнята наступна умовна класифікація поверхневих похибок [1]: $S/H > 1000$ – відхилення форми; $1000 \geq S/H \geq 40$ – хвилястість поверхні; $S/H < 40$ – шорсткість (H – висота, S – крок нерівностей (рис. 1)).

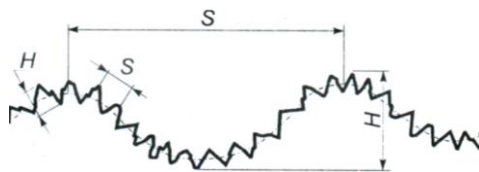


Рисунок 1 – Параметри макро- і мікрогеометрії поверхні [1]

Ці дві розглянуті характеристики якості взаємозв'язані з точністю розмірів. Високій точності завжди відповідає малі шорсткість і хвилястість поверхні. Це визначається не тільки експлуатацією виробу, але й необхідністю отримання стійких і надійних результатів оцінювання точності деталі, що є особливо важливим при проектуванні та практичній реалізації складальних операцій. Наприклад, наявність хвиль на поверхні може призводити до зменшення опорної площі в 5-10 разів у порівнянні з рівною шорсткою поверхнею [3], що може суттєво впливати на експлуатаційні і технологічні показники виробів (питомий тиск, зазори, натяги, тертя тощо) [1].

Шорсткість і хвилястість обробленої поверхні також можуть дати інформацію про динамічні параметри процесу різання, такі як вібрація шпинделя та інструменту.

Для оцінювання похибок обробленої поверхні досить часто використовується профілометр моделі П-283 (табл. 1), який дає змогу вимірювати тільки шорсткість поверхні, у той час, як для вимірювання її хвилястості у теперішній час спеціальних приборів ще не створено.

Таблица 1 – Основні технічні характеристики профілометра П-283 [4]

Параметр шорсткості, що вимірюється	Ra
Діапазон вимірювання, мкм	0,02-10
Характеристика основної приведенної похибки: межа допустимої систематичної складової, %	10
межа допустимого середньоквадратичного відхилення випадкової складової, %	2
Значення відсічки кроку, мм	0,25; 0,8
Радіус кривизни вершини щупа, мкм	10
Радіус кривизни опорної частини датчика, мм	50

Мета роботи

Розробити методику оцінювання динамічного стану системи різання шляхом вимірювання шорсткості і хвилястості обробленої поверхні за допомогою модернізованого профілометра моделі П-283.

Основна частина

Оцінювання динамічного стану системи різання при точінні за шорсткістю і хвилястістю обробленої поверхні профілометр П-283 модернізовано таким чином, щоб стало можливим вимірювати та оцінювати не тільки параметр шорсткості Ra (див. табл. 1), а й параметр Rz, а також параметри хвилястості обробленої поверхні (S та H).

Для цього було прийнято 2 засоби реєстрації геометричних параметрів відхилень форми обробленої поверхні: за відхиленням положення вимірювального щупу у радіальному напрямі та за його поздовжнім переміщенням. Принципова схема модернізованого профілометра П-283 наведена на рис. 2. В якості записуючого пристрою використано АЦП моделі LTR-22 (7) у комплекті з персональним комп'ютером (9).

Основною метою модернізації профілометра є додавання до профілограм реальної довжини вимірюваної поверхні. Це дозволяє не тільки встановити значення шорсткості за параметрами Ra або Rz, а і прослідкувати переміщення вершини різця по відношенню до деталі знаючи частоту обертання та подачу при обробці. До базової конструкції профілометра доданий датчик, що реєструє один оберт привідного двигуна, що відповідає 0,0319 мм переміщення вимірювальної голки. Таким чином при вимірюванні шорсткості з'явилася можливість виявити залежність відхилення Ra в мкм на довжині вимірювання в мм, що записується у цифровому вигляді за допомогою ПК.

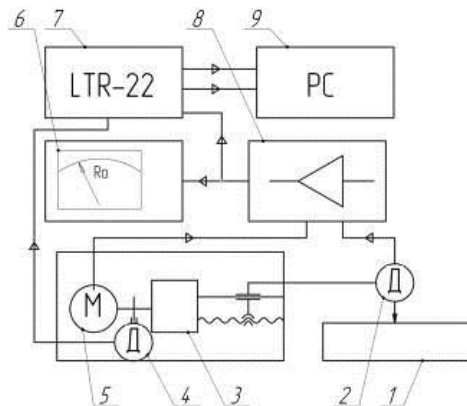


Рисунок 2 – Принципова схема модернізації профілометра П-283

1–дослідний зразок для вимірювання шорсткості, 2–вимірювальний шуп з датчиком, 3–редуктор, 4–датчик підрахунку кількості обертів двигуна, 5–двигун приводу шупа, 6 – прилад із показником шорсткості, 7–АЦП, 8–підсилювач, 9– персональний комп'ютер (ПК)

Реєстрація довжини переміщення вимірювальної голки відбувається шляхом вимірювання кількості обертів приводного двигуна. Коефіцієнт співвідношення між 1 оборотом двигуна та переміщенням вимірювальної голки складає 0,0319мм/об. Кількість обертів за одне вимірювання реєструється датчиком 4 та передається на АЦП (7) (рис. 2).

Відхилення голки від нульового положення при вимірюванні реєструється датчиком 2 профілометра. Сигнал подається на підсилювач 8. Після підсилення сигнал реєструється за допомогою АЦП (7), та вимірюється приладом (6), який показує фактичне значення виміряної шорсткості. Зареєстровані сигнали з датчиків передаються на ПК (9), де в подальшому обробляються.

Проведена модернізація профілографа П-283 дає змогу виконувати вимірювання реальної довжини вибраної ділянки обробленої поверхні, що дозволяє прослідкувати переміщення вершини різця по відношенню до деталі при відомих частотах обертання шпинделя та подачі у процесі точіння дослідного зразка (1). Як було зазначено вище, апаратно описана модернізація була реалізована шляхом приєднання датчика обертів приводного двигуна вимірювальної головки, а отриманий сигнал у цифровому вигляді передається через АЦП LTR - 22 на ПК, що дозволило виконати спектральний аналіз похибок форми обробленої поверхні з визначенням необхідних параметрів як шорсткості, так і хвилястості обробленої поверхні.

Синхронізація результатів вимірювання амплітуди коливань у технологічній системі з результатами аналізу параметрів шорсткості обробленої поверхні

Синхронізація результатів вимірювання амплітуди коливань у технологічній системі з результатами аналізу параметрів шорсткості обробленої поверхні здійснювалась за алгоритмом, представленим на рис.3.

Результати вимірювання амплітуди коливань інструменту датчиком D_i як функції від часу, використовуються в виразі у вигляді додатку $a_i(t)$ відносно базового (нульового) рівня коливань технологічної системи, за який було прийнято показники датчика D_{st} , що у виразі записані у вигляді додатку $a_{st}(t)$, після швидкого перетворення Фур'є перетворюються у показники частот власних коливань відповідних вузлів, з яких складається технологічна система.

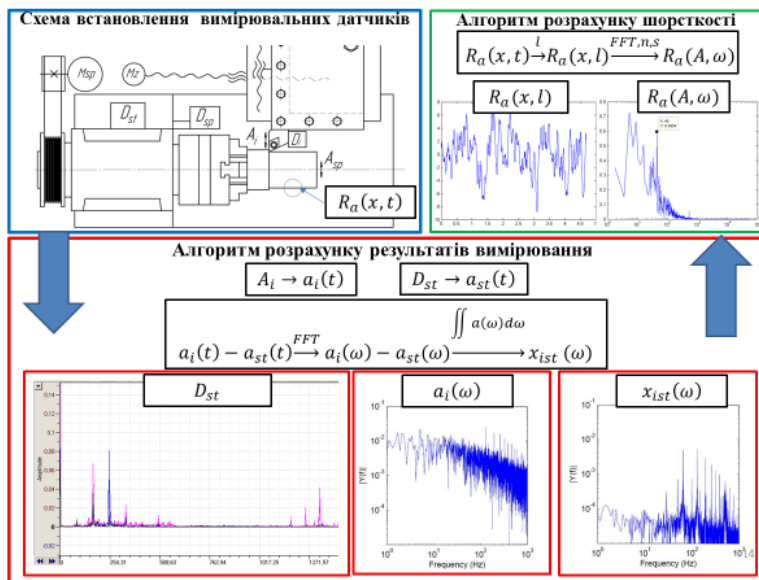


Рисунок 3 – Алгоритм синхронізації результатів вимірювання амплітуди коливань у технологічній системі з датчиків експериментального стенду та результатів контролю параметрів якості обробленої поверхні

Це дозволило, після подвійного інтегрування різниці частот власних коливань різця та задньої бабки визначити чисельне значення коливання інструменту в одиницях довжини. На основі отриманих результатів стало можливим дослідити вплив частоти обертання та подачі на висоту мікронерівностей (шорсткості) обробленої поверхні, за рахунок наявності точної інформації про відносне коливання інструменту у кожний конкретний момент часу при відповідних співвідношеннях параметрів режиму різання.

Аналіз динамічного стану технологічної системи, шляхом спектрального аналізу мікрогеометрії обробленої поверхні

За результатами аналізу експериментальних даних було виявлено, що профіль обробленої поверхні деталі залежить від явищ і процесів, які відбуваються при зрізуванні припуску та динамічного стану технологічної системи в процесі різання. Ці явища відображаються на поверхні як фізична, геометрична та вібраційна складові шорсткості. Для того, щоб більш детально розглянути та конкретніше виділити внесок кожного процесу в рельєф обробленої поверхні запропоновано виконати спектральний аналіз профілограми обробленої поверхні (рис. 4 - 6). Для цього було виконано спектральний аналіз профілю обробленої поверхні за допомогою процедури calcRa за, наприклад, таким алгоритмом (рис. 4):

```
Prof=prof;  
%Исходный массив - 3 колонки.  
% первая - время  
% вторая - профиль  
% третья - отметчик  
%Ra - величина шероховатости по прибору.  
Rad=3.1;%roughness scale  
  
s=0.089; %подача  
n=9360/60; %частота вращения шпинделя в Гц  
profm=calcRa (Prof,Rad);  
  
%данные в переменной prof  
Fs0_b=1/(profm(2,1)-profm(1,1));  
Fs=Fs0_b*s*n;  
prof1=profm(:,2);  
L=length(prof1);  
  
Y=fft(prof1);  
P2 = abs(Y/L);  
P1 = P2(1:L/2+1);  
f = Fs*(0:(L/2))/L;  
figure(1);  
semilogx(f,P1);  
figure(2);  
plot(profm(:,1),prof1(:,1));  
figure(3);  
semilogx(s.*n./f,P1);
```

Рисунок 4 – Алгоритм обробки сигналу профілографа

В подальшому була побудована профілограма в координатах «висота мікронерівностей, мкм – частота, Гц», що дозволило відтворити формування профілю обробленої поверхні в реальному часі. Для цього в програму fft_an (див. наведений приклад) були введені реальні значення частоти обертання шпинделя та подачі, на яких проводилась механічна обробка аналізованих

поверхонь. Це дозволило отримати спектри мікронерівностей обробленої поверхні в координатах: («Ra, мкм - Частота зустрічання мікронерівностей, Гц» (рис. 5)). Зі спектрального аналізу поверхні обробленої з частотою обертання шпинделя $n=5700$ об/хв і подачею $s = 0,05$ мм/об видно, що пік мікронерівності, яка відповідає найбільш глибокій западині $Ra = 0,28$ мкм, має місце при резонансній частоті коливання інструменту близько 10^2 Гц (95,28 Гц), причому ця западина зустрічається на обробленій поверхні з кроком 0,042 мм, що досить близько до значення подачі $s = 0,05$ мм/об, з якою виконувалось точіння.

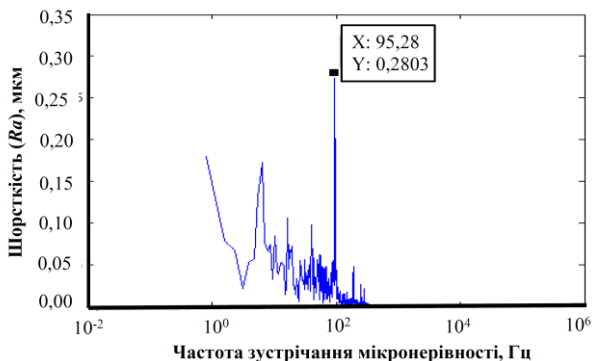


Рисунок 5 – Спектр шорсткості поверхні обробленої при:
 $n=5700$ об/хв, $s = 0,05$ мм/об

Це доводить припущення по те, що при частоті обертання $n=5700$ об/хв домінуючим фактором формування мікронерівностей є геометрична складова, тобто подача.

Аналогічний висновок можна отримати зі спектрального аналізу поверхні, обробленої з частотою обертання $n=8530$ об/хв і подачею $s = 0,05$ мм/об, який свідчить про те, що пік мікронерівності, що відповідає найбільш глибокій западині $Ra = 0,3637$ мкм спостерігається при резонансній частоті коливання інструменту 140,4 Гц (рис. 6).

Подальший спектральний аналіз обробленої поверхні в координатах (Ra, мкм/ Крок мікронерівностей, мм) засвідчив, що виявлена западина $Ra = 0,3637$ мкм з'явилася на обробленій поверхні з таким же кроком 0,045 мм, що досить близько до значення подачі $s = 0,05$ мм/об, з якою виконувалось точіння. Це також підтверджує припущення про те, що при частоті обертання $n=8530$ об/хв домінуючим фактором формування мікронерівностей є геометрична складова, тобто подача.

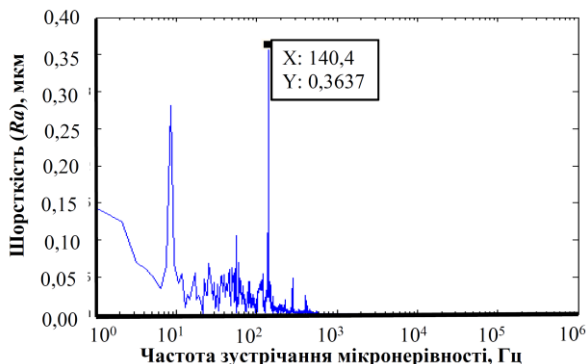


Рисунок 6 – Спектр шорсткості поверхні, обробленої при: $n=8530$ об/хв, $s=0,05$ об/хв

Зі спектрального аналізу поверхні обробленої з частотою обертання $n=10100$ об/хв і подачею, $s=0,05$ мм/об пік мікронерівностей, що відповідають найбільш глибокій западині $R_a = 0,9376$ мкм спостерігається при резонансній частоті коливання інструменту 77,71 Гц.

Подальший спектральний аналіз обробленої поверхні в координатах (R_a , мкм/ Крок мікронерівностей, мм) засвідчив, що виявлена западина $R_a = 0,9376$ мкм з'явилася на оброблюваній поверхні з кроком 0,0957 мм (рис.7), що є значно більшим за значення подачі $s=0,05$ мм/об, на якій виконувалось точіння. Це свідчить про те, що при частотах обертання $n>10000$ об/хв домінуючим фактором формування мікронерівності є не геометрична складова, а вібраційна, яка майже в 2 рази перевищує геометричну складову.

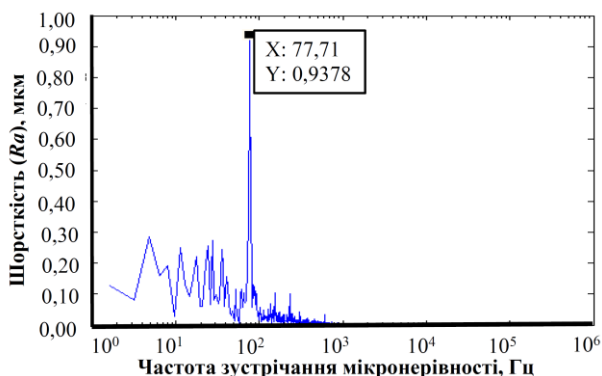


Рисунок 7 – Спектр шорсткості поверхні обробленої при: $n=10100$ об/хв, $s=0,05$ об/хв

Висновки

1. Розглянуто взаємозв'язок динамічного стану системи різання (амплітуди та частоти коливань, що виникають у процесі різання при точінні) з геометричними параметрами якості обробленої поверхні – шорсткістю та хвилястістю.
2. Запропонована модернізація профілометра моделі П-283 та розроблена методика оцінювання динамічного стану системи різання шляхом визначення геометричних параметрів якості обробленої поверхні.
3. Наведено алгоритм синхронізації результатів вимірювання амплітуди коливань у технологічній системі з датчиків експериментального стенду та результатів контролю параметрів якості обробленої поверхні.
4. Наведено алгоритм спектрального аналізу профілю обробленої поверхні за допомогою процедури calcRa.
5. Доказано, що за шорсткістю і хвилястістю обробленої поверхні можна отримувати з допомогою модернізованого профілометра динамічні параметри процесу точіння, наприклад, частоти коливань, що виникають у процесі різання.

Список використаних джерел: 1. *Мазур, М.П.* Основи теорії різання матеріалів [Текст]: підручник / *М.П. Мазур, Ю.М. Внуков, В.Л. Доброскок, В.О. Залого, Ю.К. Новоселов, Ф.Я. Якубов*; під заг. редакцією *М.П. Мазура*. – 2-е вид. перероб. і доп. – Львів: Новий Світ-2000, 2011. – 422 с. 2. *Якімов О.В.* Технологія машино- та приладобудування [Текст]: підручник / *О.В. Якімов, В.І. Марчук, П.А. Лінчевський, О.О. Якімов, В.П. Ларшин*; під заг. ред. *О.В. Якімова* – Луцьк, Редакційно-видавничий відділ ЛДТУ, 2005 – 712 с. 3. Справочник технолога-машиностроителя в 2-х томах, т. 2. Под ред. *А.Г. Косиловой, Р.К. Мецеракова*. 4-е изд., перераб. и доп. – М.: Машиностроение. 1986 – 496 с. 4. Профилметр с унифицированной электронной системой: ТИ ОКП 39 4341 1021 / Министерство станкостроительной и инструментальной промышленности. – М, 1983. – 32 с.

Bibliography (transliterated): 1. *Mazur, M.P.* Osnovi teorii rizannja materialiv [Tekst]: pidruchnik / *M.P. Mazur, Ju.M. Vnukov, V.L. Dobroskok, V.O. Zaloga, Ju.K. Novoselov, F.Ja. Jakubov*; pid zag. redakcieju *M.P. Mazura*. – 2-e vid. pererob. i dop. – L'viv: Novij Svit-2000, 2011. – 422 s. 2. *Jakimov O.V.* Tehnologija mashhino- ta priladobuduvannja [Tekst]: pidruchnik / *O.V. Jakimov, V.I. Marchuk, P.A. Linchevs'kij, O.O. Jakimov, V.P. Larshin*; pid zag. red. *O.V. Jakimova* – Luc'k, Redakcijno-vidavnicij viddil LDTU, 2005 – 712 s. 3. Spravochnik tehnologa-mashinostroitelja v 2-h tomah, t. 2. Pod red. *A.G. Kosilovoj, R.K. Meshherjakova*. 4-e izd., pererab. i dop. – M.: Mashinostroenie. 1986 – 496 s. 4. Profilometr s unificirovannojojelektronnoj sistemoj: TI OKP 39 4341 1021 / Ministerstvo stankostroitel'noj i instrumental'noj promyshlennosti. – M, 1983. – 32 s.